

# OpenGLを用いた地震応答解析結果の視覚化プログラムの 開発とWebDB教材の製作

藤井康寿

## 要約

本研究では地震工学を学ぶ学生に対して、地震動を受けて橋梁構造物が動的挙動する現象を視覚的に把握することができる教材の製作を行った。具体的には、橋梁に甚大な被害を与える恐れのある、橋梁上部工と下部工の衝突・離間現象を再現する3次元描画手法の開発である。また、数値解析の利点を活かして、橋梁の上部工と下部工を連結する支承の解析条件を変更した数値解析を行い、その結果をデータベース化した。さらに、学生がデータベース化した結果を時間と場所の制約を受けずに閲覧でき、解析条件の相違による結果を比較検証できるように、2種類の解析結果を同時表示できるWebDBの製作を行った。学生は、対象とする橋梁モデルの緒元、適用した地震動や解析結果を、Web上に配置されたラジオボタンやチェックボックスを選択することにより、対象とする橋梁構造物に関する一連の動的挙動の結果を把握することが可能となった。

キーワード：OpenGL, 3次元レンダリングプログラム, 構造物の地震時動的挙動, WebDB

## 1. はじめに

これまで多くの研究報告で指摘されているように、兵庫県南部地震波などの震災において桁間衝突、及び桁と橋台の衝突による落橋防止装置の被害が相次いでおり、この実状を受けて、橋梁の衝突現象に関する研究が精力的に行われている。本研究では橋梁の衝突を回避することを目的として、2 径間連続桁の実橋に特性の異なる支承タイプ3種類（分散支承、摩擦支承、分散+摩擦支承）の設置方法の違い（支承タイプの組み合わせや設置位置）による構造モデル3種類を考案した（図5参照）。考案したモデルに対して地震時応答解析を行い、桁と橋台が衝突する際に発生する衝撃力（上部工と下部工の衝突により、下部工に発生した過度の部材力）を求め、得られた結果から各構造モデルの耐震性を検証した。

上述の検討と並行して、地震工学を学ぶ学生に対して、橋梁構造物が地震動を受けて動的挙動する現象を、視覚的に把握することができる教材の製作も行った。すなわち、橋梁に甚大な被害を与える恐れのある、橋梁上部工と下部工の衝突・離間現象を再現する3次元動的描画手法の開発である。具体的には、上述の構造モデル3種類に対して地震応答解析を行い、結果をモデルごとに保存した。次に、インターネットの利点である時間と場所の制約を受けずに利用できるよう8種類のWebコンテンツにまとめた。最後に、1画面上に2種類のWebコンテンツを並列して表示するとともに、動的挙動も同時再生するWebDBの製作を行った。その結果、学習の進捗に応じて、ラジオボタンやチェックボックスから必要

とする内容を選択することで、各構造モデルの動的応答に関連する情報を一画面上に同時表示されるので、比較検証しながら学修することが可能となった。

## 2. 橋梁の諸元およびモデル化

本稿では図1に示す小塚橋<sup>(1)</sup>を採用し、解析及び動的挙動の描画を行う。上部構造は橋長 64.8m、幅員 8.2m、下部構造の幅員は 8.2m である。桁と橋台の遊間は左右ともに 10cm である。重量は桁 5938.80 (kN)、A1 橋台 5250.84 (kN)、A2 橋台 5576.20 (kN)、P1 橋脚 9836.26 (kN) である。

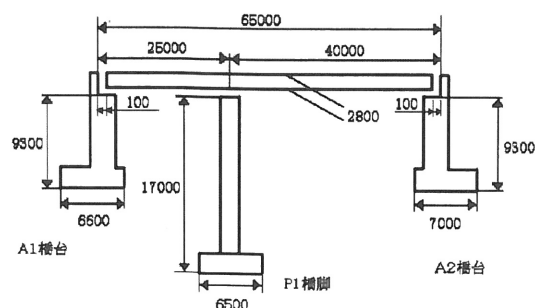


図1 小塚橋 (単位: mm)

この小塚橋を図2のように21の節点に分割し、表1に示す各部材の断面特性を入力する。また、図3に示す9つの代表点に縮合することで解析の効率化を図る。このとき、各代表点重量は表2に示す値を入力する。また、

図3に示す9つの代表点に縮合することで解析の効率化を図る。このとき、各代表点重量は表2に示す値を入力する。ここで縮合とは、振動解析において構造物の自由度を「解析に用いる自由度」と「その他の自由度」に分け、その他の自由度を無視するのではなく静的つり合いの条件式を用いて「解析に用いる自由度」に「その他の自由度」を代表点に対応させる手法である。具体的には、構造物の水平変位が他の垂直変位や回転変位に比べて大きい場合、解析に用いる自由度として節点の水平変位のみを採用する。

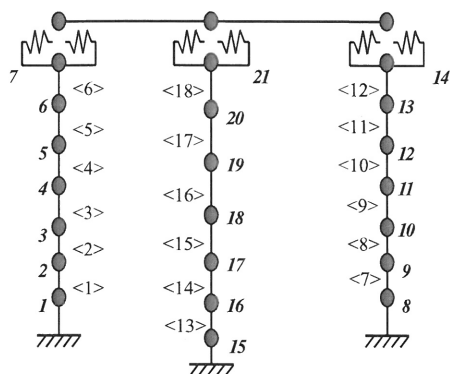


図2 節点番号と部材番号  
(<数字>：部材番号、太字斜体：節点番号)

表1 橋台、橋脚部材の断面特性

部材番号	両側節点		断面積 $\text{cm}^2$	断面2次モーメント $\text{cm}^4$	部材長 $\text{cm}$
1	1	2	59,800	21,000,000	100.0
2	2	3	59,800	21,000,000	100.0
3	3	4	14,760	39,900,000	182.5
4	4	5	14,760	39,900,000	182.5
5	5	6	14,760	39,900,000	182.5
6	6	7	14,760	39,900,000	182.5
7	8	9	57,400	23,400,000	100.0
8	9	10	57,400	23,400,000	100.0
9	10	11	15,580	46,900,000	182.5
10	11	12	15,580	46,900,000	182.5
11	12	13	15,580	46,900,000	182.5
12	13	14	15,580	46,900,000	182.5
13	15	16	59,800	21,000,000	100.0
14	16	17	59,800	21,000,000	100.0
15	17	18	20,500	10,680,000	375.0
16	18	19	20,500	10,680,000	375.0
17	19	20	20,500	10,680,000	375.0
18	20	21	20,500	10,680,000	375.0

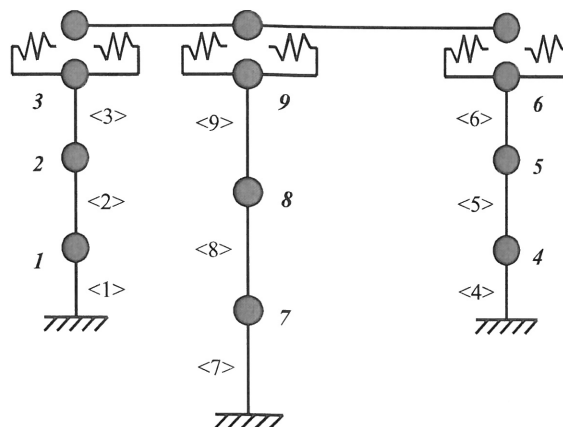


図3 代表点番号と部材番号  
(<数字>：部材番号、太字斜体：代表点番号)

表2 代表点重量

代表点番号	図3における 節点番号	代表点重量 ( $\text{kN}$ )
1	2	2753.8
2	5	2459.8
3	7	333.2
4	9	2646.0
5	12	2597.0
6	14	333.2
7	16	2753.8
8	19	5311.6
9	21	1773.8

### 3. 支承タイプと構造モデル

2径間連続桁橋に設置する支承は図4に示す3タイプを用いる。また、橋台と橋脚に設置する支承タイプの違いから3種類の構造モデルを考案した（図5参照）。

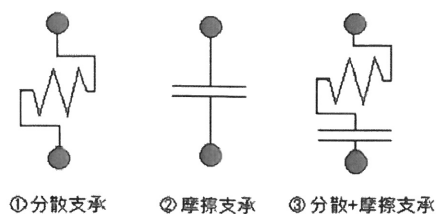


図4 支承タイプ

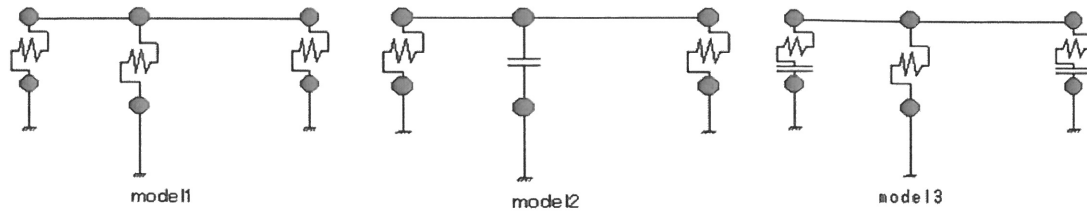


図5 橋台、橋脚支承タイプの異なる3種類の構造モデル

これは実橋 (model1) の他に、図4に示す支承タイプの設置が異なる構造モデル2種類 (model2 と model3) である<sup>(2)</sup>。

#### 4. 衝撃力の算定方法と耐震性に優れた構造モデル

衝撃力の検証は、次式の算定式を用いる。

$$\begin{aligned} (\text{衝撃力}) &= (\text{衝突させた場合の部材力}) \\ &\quad - (\text{衝突させない場合の部材力}) \end{aligned}$$

すなわち、桁と橋台の衝突が発生しない場合の下部工に作用する部材力と、衝突が発生した場合の部材力の差を、衝突による衝撃力として算定するのである。考案した構造モデル3種類 (図5参照) に対して衝撃力を求め、“地震加速度の大きさの変化による部材力に占める衝撃力の割合の変化”を100%積み上げ式棒グラフで表し比較検討した結果、次の結論が得られた。すなわち、3種類の構造モデルの中で、model2は衝撃力の占める割合が地震加速度の増加に伴って減少する耐震性に優れた構造モデルであることが判明した。

### 5. OpenGL を用いた橋梁構造物の3次元表示と地震時応答挙動の Web コンテンツの作成

#### 5.1 橋梁モデルの OpenGL による3次元表示

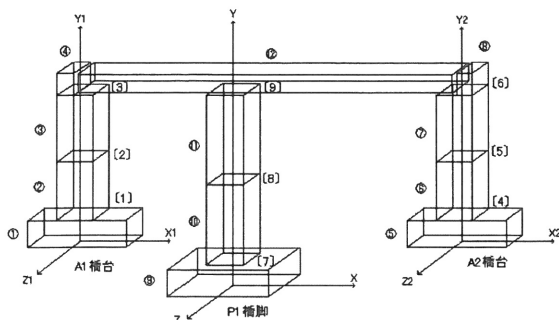


図6 橋梁のブロック構成  
(○付数字はブロック番号、()付数字は代表点番号)

OpenGL<sup>(3),(4)</sup>による橋梁の作図は図6に示すように、A1、A2橋台がそれぞれ4個ずつ、P1橋脚が3個、橋桁1個の計12個の六面立方体ブロックで構成する。各ブロックの高さ (height) はちょうど代表点の高さと一致するように設定する。このようにブロックの高さを設定することで、例えばA1橋台の場合では、時々刻々の応答変位をブロック①-②、②-③、③-④の分割面を構成する座標に加えれば、地震時の橋梁を動画として再現することができる。橋梁を12個のブロックで構成させることは、各ブロックの寸法 (width、height、depth) を配列に格納して扱うことができるため、コードの作成が簡潔になるからである。さらに、非常に大きなブロックの代表点のみに解析結果である応答を入力しても、立方体を構成する頂点及び個々のブロック間の保管がスムーズかつ連続的に行われる。すなわち、地震時における橋梁の動的応答をレンダリングするには、OpenGLで作成した橋梁モデルに対して、図6に示す[]付数字で表示された代表点1～9の時々刻々の応答変位 (絶対変位) を入力することで描画できる<sup>(5)</sup>。

橋梁を構成する各ブロックの頂点座標を設定するためには下部工 (A1、A2橋台、P1橋脚) の相互位置関係を考慮しなくてはならない。これらの座標設定を手軽にし、後に設計寸法の変更を容易に行えるようにするため、A1、A2橋台を構成するブロックの座標設定には局所座標系を用いた。図6に示すようにP1橋脚の最下ブロックの底面中央が全体座標系 (X、Y、Z) の原点と一致するように橋脚を設置し、このときのA1、A2橋台の最下ブロックの底面位置 (座標が設定しやすい位置を選出する) に局所座標系 (X1、Y1、Z1)、(X2、Y2、Z2) を設定し、原点を (x1、y1、z1)、(x2、y2、z2) とする。その際、桁が水平になるように下部工の寸法を考慮して局所座標系を設定しなくてはならない。これらの座標系内において、A1、A2橋台とP1橋台のブロックの頂点座標 (8頂点) を配列 "width(添字)"、"height(添字)"、"depth(添字)" を用いることで設定する。また、橋桁はP1橋脚の上ののせたX軸方向に伸びた六面体と

して扱い、P1 橋脚同様に全体座標系内で頂点座標を設定する。地盤は橋梁のサイズに比べて十分に大きい平面（円形でも四角形でも良い）を置くことで表現する。

表3 橋梁を構成するブロック寸法

ブロック番号	位置	Width (m)	Height (m)	Depth (m)
①	A1 橋台	6.5	2.00	8.2
②	A1 橋台	1.8	4.65	8.2
③	A1 橋台	1.8	3.65	8.2
④	A2 橋台	7.0	2.00	8.2
⑤	A2 橋台	1.9	4.65	8.2
⑥	A2 橋台	1.9	3.65	8.2
⑦	P1 橋脚	6.5	2.00	8.2
⑧	P1 橋脚	1.8	8.50	8.2
⑨	P1 橋脚	1.8	7.50	8.2
⑩	A1 橋台	0.6	3.10	8.2
⑪	A2 橋台	0.6	3.10	8.2
⑫	桁	65.0	2.80	8.2

全体座標系の原点  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$   
 局所座標系 1 の原点  $(x_1, y_1, z_1) = (-25, 7.7, 0)$   
 局所座標系 2 の原点  $(x_2, y_2, z_2) = (40, 7.7, 0)$

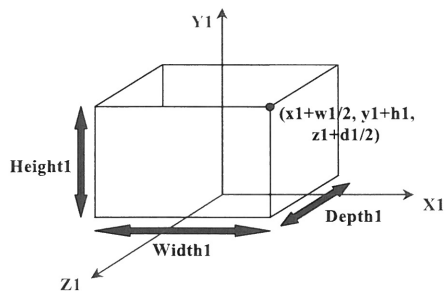


図7 A1 橋台最下ブロック（原点  $(x_1, y_1, z_1)$ ）

例えば、図7にA1橋台のブロック（図6のブロック①）の頂点座標の取り方を示す。先にも述べたように1個のブロックに対してそれぞれ幅、高さ、奥行きを用いることで頂点座標を設定し、例えば図中の点で示した頂点の座標  $(w/2, h, d/2)$  を設定し、局座標系の原点座標  $(x_1, y_1, z_1)$  を加えれば全体座標系  $(X, Y, Z)$  内における頂点座標が設定できる。また、ブロック①より上のブロック（図6のブロック②、③、④）の頂点座標に関しては、高さを順次加えることで同様に設定できる。表3に各ブロックの寸法（幅、高さ、奥行き）を示す。

このように各ブロックの座標値を設定して作画した

OpenGLによる橋梁モデルの静止画像を図8、図9に示す。OpenGLでは視点と注視点を設定することで作成したモデルを見ることができ、マウスとカーソルキーで視点と注視点を操作できるようにすれば、前もって図8の位置で作成したモデルでも、図9のように斜め方向から眺めることが可能となる。OpenGLで作成されたオブジェクトはあらゆる位置や角度からの視察が可能であり、インタラクティブな操作性を得ることができる<sup>(2)</sup>。

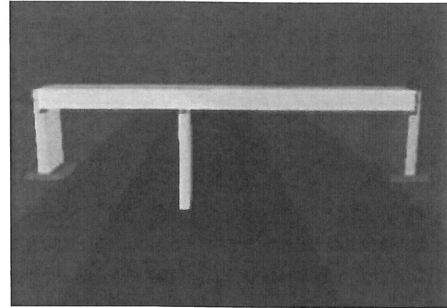


図8 OpenGLによって作成された橋梁の三次元画像（正视图）

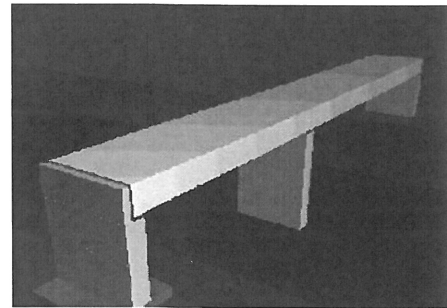


図9 OpenGLによって作成された橋梁の三次元画像（斜视图）

## 5.2 地震時応答挙動のWebコンテンツの作成

OpenGLによる橋梁モデルは、動的応答解析プログラムを用いてレンダリングに必要なデータ（各代表点における絶対変位）を作成したOpenGLモデルに作用させることによりディスプレイ上に表示させる。このとき表示するモデルは、地震時の応答挙動の変化を観察するため、活用する地震とその最大地震加速度の大きさは700galとして、原設計（実橋）であるmodel1と、model2（静止摩擦係数=0.1）、model3（静止摩擦係数=0.3）の3種類である。また、バネ抗力の変化による応答挙動の変化を観察するために、「バネ抗力1倍」と「非衝突時バネ抗力」の場合も検討する。このうち第4章の考察より、優れた耐震性を発揮するmodel2においては、地震加速度の違いによる応答挙動の変化を観察するために、地震加速度700galに加え、300gal、100galの場



合の地震時応答も描画する。このときレンダリングの表示時間は15秒間、解析時間に換算しておよそ2秒間(7.5秒～9.5秒間)とする。また、橋梁の全景図とは別に、視点と注視点を操作して橋台頭頂部の拡大図も表示する。全景図は橋梁全体の挙動が良く分かるよう、斜め上方より見下ろした視点(図9の斜視図)を表示し、拡大図は桁と橋台の衝突現象が判別し易いよう、A1橋台頭頂部を真横から描画する。

本研究でレンダリング表示する結果は、橋梁全景図と橋台拡大図の2種類である。また、開発したWebDBは、第6章で後述する8種類のWebコンテンツの中から2種類を選択すると、並列表示できるようJavaScriptを用いてWebページを構築した。このとき8種類のWebコンテンツの内訳は、上述の3種類の構造モデルに関して、バネ抗力の違いによる結果が2種類ずつ得られるので合計6種類、その他、model2においては通常の700galの他に、加速度の違いによる2種類の結果(200galと100gal)が得られる。計8種類のWebコンテンツは、以下に示すように同じ形式で表示される。すなわち、橋梁全景図と橋台拡大図のレンダリング表示のほかに、A1橋台に着目した橋台頭頂部-上部工間相対変位折線グラフ(応答曲線)と、部材力-衝撃力割合棒グラフ(100%積上棒グラフ)を縦に並べて配置することで一枚のWebページにまとめる。

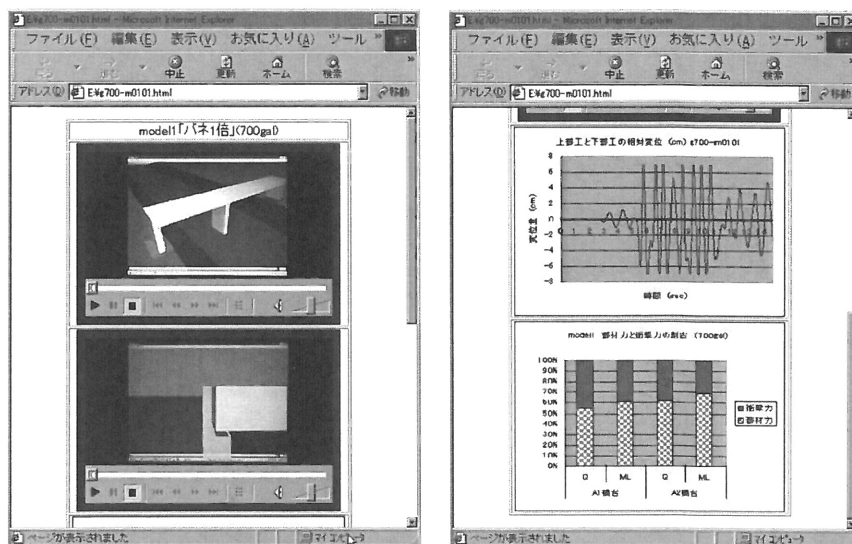
図10に作成したWebページを示す。画面右のスクロールバーを動かすことで、下に配置されている応答曲線と棒グラフを閲覧することができる。

## 6. WebDB のシステム構成と製作結果

5.2節ではWebDBを構築するための準備として、Webページ(コンテンツ)で取り扱うモデルや画面構成について記述した。本章では個々に作成した8種類のコンテンツを簡便に閲覧できるようJavaScriptを用いて1つのホームページとして集約する。

図11に構築したWebDBのフローを示す。図中④「解析結果」の※1、※2は、5.1節で詳述した橋梁全景図と橋台拡大図(計4種類)が一枚のWebページ上で同時再生されるので、比較検証ができる(WebDBの表示結果、図12参照)。その他、項目②「解析モデル」と項目③「解析条件」は、本研究で取り扱った構造モデルや入力地震波などの内容を解説するWebページ群である。これらを統括するのが項目①「トップメニュー」であり、起動直後に表示される画面である。利用者はトップページに表示される項目②～④の中のいずれかを選択して学習するのである。

図13にWebDBを起動したときのトップページを示す。利用者は配置されたラジオボタンの閲覧項目のいずれかを選択するのである。なお、トップページ以外の②解析モデル、③解析条件および④解析結果のページについても同様の操作である。これは選択項目を細分化することで、必要な情報を段階的に修得できる仕組みになっている。一方、既に理解した内容に関しては、図11の項目⑤に見られるように、いずれの表示状態であっても、トップページに戻ることができ、他の項目を閲覧できる配慮を施してあるので、利用者の習熟に合わせた利用が可能となる。



a) スクロールバーが上方にある状態

b) スクロールバーが下方にある状態

図10 作成したWebページ

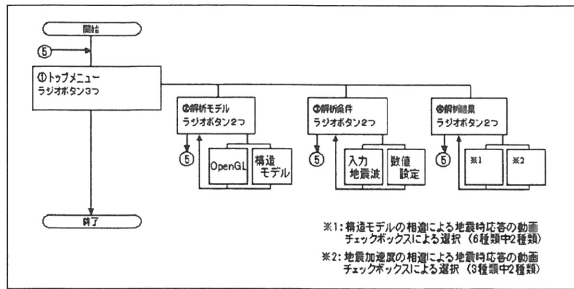


図 11 WebDB 全体フローチャート



図 12 動的応答の2画面同時再生

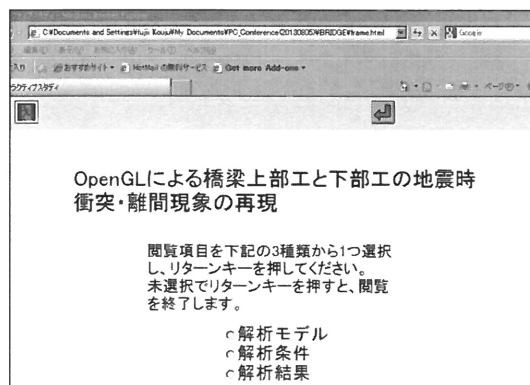


図 13 WebDB トップページ

## 6.1 地震時応答挙動の Web コンテンツの作成

WebDB の製作を行い、2種類の構造モデルの地震時応答挙動を同時再生した結果、以下の項目 1) から 3) の知見が得られた。

### 1) 構造モデルの相違による地震時応答挙動の考察

構造モデルの動的挙動は、支承タイプの設置箇所に大きく影響することが判明した。具体的には、分散支承を橋台に設置すると、橋梁上部工は衝突と反発を繰り返す反復運動を呈する。これはバネが反発力を持っているため、バネが縮むことで上部工の振動を抑制できる反面、

衝突後はバネが伸びようとする反発力により、上部工を押し出す方向に加速度を付加する作用が発生するからである。分散+摩擦支承として橋台に設置した場合、分散支承のみと挙動が異なる。摩擦支承に関しては、地震加速度が小さい場合でも応答変位が発生するが、慣性力による上部工の振動を抑制する効果が期待できる。事実、橋脚に摩擦支承を設置すると、一定の摩擦力が生じる代わりに、応答変位が減少する結果が得られることが判明した。

### 2) 設定したバネ効力の値の相違による地震応答挙動の考察

設定バネ効力値の違いによる地震応答挙動には、明確に判別できる相違点は見当たらなかった。レンダリング描画から3種類のモデルに共通して判定できることは、「バネ抗力1倍」の場合に比べ「非衝突時バネ抗力」の場合は、振動周期が短いことである。その他、応答曲線からは、「非衝突時バネ抗力」に相当する分散支承を橋台に設置すると、上部工の衝突を回避する有効な手段となり得るが、慣性力により発生する振動を低減させることはできずに振動し続けることが判った。

### 3) 地震加速度の相違による変化

地震加速度の相違による橋梁の地震応答挙動の観察には、model2 (静止摩擦係数 = 0.1) のレンダリング描画を用いた。レンダリング描画の観察同様に、応答曲線より入力波の地震加速度が小さくなるにつれて、衝突回数の減少が見られた (地震加速度 700gal で 15 回、300gal では 5 回、100gal では 1 回の衝突)。地震動が収束に向かう 11.5sec 以降は、地震動の強制外力による橋梁上部工へ与える影響は小さくなり、慣性力で振動している状態である。この状況下で、地震加速度 700gal の場合、上部工の挙動が収束に向かいつつあるにも拘わらず、300gal では一定振幅 (+5 cm ~ -2 cm) の状態を保持していた。100gal では、振幅が大きくなり、11.7sec 付近で 1 回の衝突が発生した。以上の結果から、橋脚に設置した摩擦支承は、入力地震加速度が増大するにつれて、上部工の変位を抑制する方向に摩擦力が働き、耐震性を発揮することが判明した。

## 7. まとめ

本研究では OpenGL を用いて橋梁の三次元モデルを作成し、地震時における橋梁の応答挙動をレンダリング描画した。また、3種類の構造モデル、解析条件が異なる場合のレンダリング表示、及び応答曲線を描画して、双方を対比させながら検討ができる WebDB 教材を製作した。WebDB 教材を活用して得られた結論を以下に示す。

(1) OpenGL で作成した橋梁モデルを用いてレンダリングするに際して懸念されるのが、A1、A2 橋台と P1 橋脚には応答を入力する箇所がそれぞれ 3 箇所しかないことであり、下部工の変形挙動が連続的に再現されない（ロボット腕のように折れ曲がる）恐れがあることである。しかし、実際にレンダリングした結果、ブロックの上面・下面は補間され、下部工はほぼ連続的な変形が得られることが確認できた。これは、下部工を分割した六面体は 8 つの頂点座標を直線で結ぶことで描写されており、個々の六面体において、上面と底面が変位した場合の六面体は、正面から見てせん断変形が生じたときのように平行四辺形に変形するためである。

(2) レンダリング描画中に、衝突により下部工（A1 橋台）が押され、その直後に桁を押し返すという離間現象を確認することができた。さらに、桁と橋台が相反する向きに変位したときに起こる衝突で、桁が橋台を引っ張るようにして発生する下部工の衝突も確認できた。

(3) 上部工と下部工の衝突・離間現象を、OpenGL の動画によるレンダリングを通して画面上で実際に観察して認識される大きな利点は、上部工と下部工の衝突が同方向速度による追いつき衝突と反対速度の正面衝突のいずれが多く生じているかを容易に読み取れることにある。

(4) 地盤の挙動もレンダリング描画で再現することで、橋梁は振動する台上で揺れているモデルとして観察が可能である。地盤の揺れが大きいときは、桁は地盤と一体である橋台に押されるようにして滑動する様子が確認できたが、地盤の揺れが小さくなった時間帯では桁が自由振動を呈していることもレンダリング描画から認識することが判明した。

(5) WebDB の構築に関しては、簡単な選択肢を適正に配置することで、利用者がホームページ中を自由に行き来でき、必要な情報を享受できるシステムを設計し開発した。また、3 次元描画の表示に関してもラジオボタンによる選択で、8 種類の Web コンテンツの中から

2 種類（橋梁全景図と橋台頭頂部拡大図の計 4 種類の動画）を同一 Web ページ上で同時に再生する表示形式を考案した。同時再生により、橋梁モデルの相違による衝突、離間現象や慣性振動の様子を視覚的に把握できるようになった。

(6) model2 は他の構造モデルとは異なり、変位を抑制する方向に作用し、慣性振動に対して効力を発揮した。さらに、最大地震加速度の違いによる応答曲線の考察結果から、入力地震加速度の最大値が増大するにつれて、上部工の変位を抑制する方向に摩擦力が作用したので、耐震性も有するモデルであることが判明した。以上の結果から、考案した 3 種類の構造モデルの内、最も耐震性を発揮するのは、model2 の支承タイプの配置であることが明らかになった。

## 註

本稿は、2013PC カンファレンス・CIEC（コンピュータ利用教育学会）（東京大学）で発表したものに加筆したものである。

## 参考文献

- (1) 村瀬康彦・藤井康寿・中川建治：地震時に発生する橋梁上部工と下部工間の衝撃力の緩和に関する研究，佐藤鉄工技報，Vol.14，pp.3-10，2001.
- (2) 藤井康寿・片山延洋・深谷定充・中川建治・村瀬安彦：OpenGL による橋梁上部工と下部工の地震時衝突・離間現象の再現とその評価，土木構造・材料論文集，第 19 号，pp.85-92，2002.12.
- (3) ポール・マーツ著（松田晃一，松田真梨子訳）：OpenGL の真髄，ピアソン・エデュケーション，2007.12.
- (4) 床井浩平：OpenGL 入門 2 テクスチャマッピング，工学社，2008.1.
- (5) 藤井康寿：免震床を有する建築構造物の地震応答解析結果を視覚化する方法の開発，メディア教育研究，第 9 号，第 1 号，pp.D1-D12，2012.12.